

基于小波多尺度分析及 Fisher 分割的红外 弱小目标检测*

李红 郑成勇 高景丽
(华中科技大学数学系,湖北,武汉,430074)

摘要 介绍一种新的红外图像序列中的弱小目标检测方法. 利用小波多分辨特性,对图像进行预处理,以抑制背景杂波;利用改进的 Fisher 算法,对经预处理后的图像进行分割,最终将目标从背景中分离出来;对相邻帧进行差分运算,估计目标的运动轨迹. 采用本文方法与类别方差自动门限法,对大量的红外弱小目标进行了检测,实验对比结果表明了该算法的有效性.

关键词 小波多尺度分析, Fisher 分割, 红外目标, 目标检测.

WEAK AND SMALL OBJECT DETECTION BASED ON WAVELET MULTI-SCALE ANALYSIS AND FISHER ALGORITHM*

LI Hong ZHENG Cheng-Yong GAO Jing-Li
(Department of Mathematics, HUST, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Proposing a novel method to detect weak and small targets in infrared image sequences. Preprocess is imposed on image by use of wavelet multi-scale analysis to inhibitor arbitrary background. By utilizing the improved Fisher algorithm, we then threshold the preprocessed images, and separate the targets from the background. Target's pose estimation is obtained through computing the difference of two near frames that have been threshold. Comparing the experimental results on real IR image sequence to that of automatic threshold on class variance show its effectiveness.

Key words wavelet multi-scale analysis, fisher threshold, infrared targets, target detection.

引言

红外成像制导技术是通过敏感热图像中的目标在一定波段上的能量,自行对目标进行搜索、跟踪、识别和捕获的一种目标检测技术,具有智能化程度高,隐蔽性好,作用距离远等优点,是当前精确制导领域研究的关键技术之一^[1]. 其中,目标识别和跟踪算法是该技术的核心. 在目标检测和识别过程中,由于成像的距离远,目标在成像平面上只占几个至几十个像素,呈现为小目标,基本无形状和纹理特征可用^[2],因而,利用传统的方法即根据目标大小、形状及特征的图像处理技术无法得到有效利用.

本文所处理的对象为从运动平台上获取的以海

空为背景的红外图像序列. 由于成像距离远,图像主场或背景的运动在相邻帧表现很少,目标在背景中的运动相对突出,并可以认为是相对主场运动独立^[3],因而,将相邻帧图像中的目标从背景中分离并进行差分运算,则可估计目标的运动轨迹. 本文首先利用小波对图像进行多尺度分析,对图像的背景进行预处理,以抑制背景杂波. 在此基础上,利用改进的 Fisher 算法,对预处理后的图像进行二值分割,将目标从背景中分离出来. 对经分割的相邻帧进行差分运算,以估计目标的运动轨迹. 采用本文方法与类别方差自动门限法,对大量的红外弱小目标进行了检测,实验对比结果表明了该算法的有效性. 算法流程如图(1)所示.

* 国防科技预研基金(批准号 5140102021JW0506)资助项目
稿件收到日期 2002 - 09 - 02, 修改稿收到日期 2003 - 04 - 29

* The project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defense (No. 5140102021JW0506)
Received 2002 - 09 - 02, revised 2003 - 04 - 29

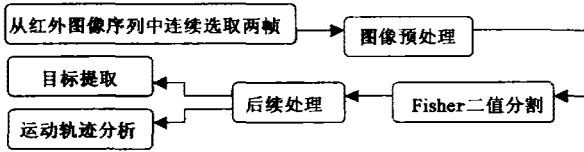


图1 算法流程

Fig. 1 Flow chart of arithmetic

1 图像预处理

1.1 小波变换的特点

具有“数学显微镜”之称的小波变换,近年来在图像处理领域中备受关注,主要原因在于^[4]:小波变换完善的重建能力,保证了信息在分解和重构过程中没有损失和冗余产生;小波变换良好的局部特性,将图像分解成逼近图像和细节图像之和,从而便于提取原始图像的结构信息和细节信息;小波基选择的灵活性为图像的不同应用提供了便利;而 Mallat 算法为小波变换的实际应用提供了必要手段。

1.2 图像预处理

为了降低虚警概率,有必要对图像进行预滤波处理,鉴于中值滤波在去除点源噪声的同时能很好地保存图像的边缘信息,本文采用 3×3 大小的窗口预先对图像进行中值滤波处理。

由于热成像系统的分辨率有限,远距离的红外成像目标通常呈点源或斑点状态,目标在成像平面上仅占几个至几十个像素。另外,由于目标信号幅值相对于背景杂波和噪声较弱,具有很低的信噪比,因而,在整体上呈现为微弱小目标。弱小目标的这种空间特性使得传统的利用目标大小、性状及特征的图像处理技术无法得到有效利用^[2]、传统的直接利用直方图的方法也由于目标像素对直方图的贡献往往被背景杂波和噪声所淹没而无法奏效^[5]。

在诸如天空、大海的自然背景中,云层和海浪的红外特征往往呈现大面积的连续分布状态,辐射的强度具有渐变的特性,从而使得它们的红外图像在灰度的空间分布上具有较大的相关性,是一种缓慢变化且非平稳的二维随机过程,目标的红外辐射强度与其周围自然背景的辐射强度无关,且一般高于背景辐射强度,可以将图像中的小目标看成是灰度和位置均未知的暂态信号,与噪声一道处于图像的高频部分,而背景处于图像的低频部分^[1,6]。基于此,为了降低背景起伏的影响,增加目标像素对直方图的贡献,便于后续阈值分割,所以利用小波变换的

多分辨特性,对图像背景进行预处理,具体方法如下:(1)根据红外目标的大小及图像噪声的强弱,对原图像进行多尺度分解,将图像的低频部分和低频部分进行分离,使得背景信息主要处于低频,而目标信息主要处于高频;(2)提取低频分量,经由小波多尺度回复,得到原图像的低频图像;(3)将原图像与低频图像差分,并取绝对值,得到主要包含目标的预处理后的图像。

2 Fisher 二值分割

设 $f(x, y)$ 为待分割的图像,其灰度范围为 $\{0, 1, 2, \dots, L-1\}$ 。对其灰度直方图进行归一化便得到各灰度级的概率分布: $p_i = n_i/N$, 其中 n_i 是灰度为 i 的像素数, N 为图像总的像素个数。设有阈值 $T = \{t_0, t_1, \dots, t_C\}$ (其中 $t_0 = 0, t_C = L$) 将图像分为 C 类。对任意的 $t_i \in T$, 且 $t_0 \leq t_i < t_C$, 确定 $\{0, 1, \dots, L-1\}$ 的一个划分: $\{t_i, t_i+1, \dots, t_{i+1}-1\}$, 相对应于 $\{p_0, p_1, \dots, p_{L-1}\}$ 的一个划分为 $\{p_{t_i}, p_{t_i+1}, \dots, p_{t_{i+1}-1}\}$ 。从而,确定阈值集 T 的过程可视为有序样品 $\{p_0, p_1, \dots, p_{L-1}\}$ 的一个聚类过程。从而,可以将多元统计分析中经典的 Fisher 算法作适当调整,对已进行低频处理的红外图像作二值分割,从而将目标与背景分离开来。

2.1 精确最优解的求法

Fisher 算法具体参见文献[7]。设 $P(n, k)$ 表示将 n 个样品分成是 k 类的一种分法, $e[P(n, k)]$ 为相应的损失函数,当 n, k 固定时, $e[P(n, k)]$ 越小表示各类的离差平方和越小,分类是合理的,因此要寻找一种分法 $P(n, k)$ 使目标函数达到极小。以下 $P(n, k)$ 一般表示使 $e[P(n, k)]$ 达到极小的分类, $code(n, k) = j_k$ 为对应于 $P(n, k)$ 的最后一类 G_k 的起始点。利用文献[7]的递推公式,可以求得 $e[P(n, k)]$ 和相应的 $code(n, k)$ 。给定 N 个样品,将其分为 k 类的方法为:首先找 $j_k = code(N, k)$, 得到类: $G_k = \{j_k, j_k + 1, \dots, N\}$; 然后找 $j_{k-1} = code(j_k - 1, k - 1)$, 得到类 $G_{k-1} = \{j_{k-1}, \dots, j_k - 1\}$; 类似的方法得到最优的分类 G_1, G_2, \dots, G_k 。

2.2 最佳分类数的确定

本文所处理的对象是红外图像中的弱小目标,虽然试验的最终目的是将图像分割成两类,从而将目标从背景中提取出来,尽管我们对图像的背景进行了预处理,降低了背景起伏的影响,增加了目标像素对直方图的贡献,但由于目标像素在整个图像中所占得比例甚小,在直方图上很难表现出双峰,直接的二值分割很难将目标从背景中分离出来。另一方

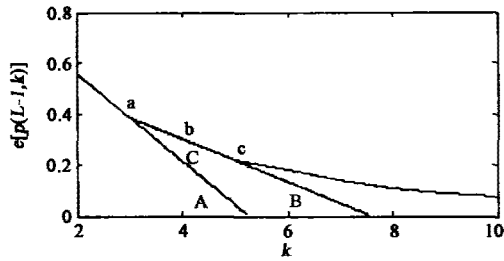


图2 损失函数与分类数 k 关系图
Fig.2 Graph of function $e[P(L-1, k)]$

面,由于目标辐射高于背景辐射,表现在图像灰度值方面为目标灰度值大于背景的灰度值.因而,如能利用2.1节计算的 $e[P(n, k)]$,确定出最佳的分类数,求得相应的分类,使得目标刚好处于最后一类,则能实现目标的精确提取.本文正是通过分析样本数 n 固定时,损失函数 $e[P(n, k)]$ 和分类数 k 的关系,确定出所要的分类数.

图2为根据Fisher算法,对一实际的红外图像进行计算所得,其中 L 为灰度级数, k 为分类数.显然, $e[P(L-1, k)]$ 关于 k 单调递减.当分类数从2变成3时,损失函数下降的速度明显快于分类数从3变到4时的下降速度.一般地,当分类数增加时,损失函数下降加快,表明样品在各类中的重新分配以及类内一致性的增强越明显,因而增加分类数对于样品整体分类是合理的.基于此,将 $e[P(L-1, k)]$ 对 k 作图,对图中的每一点 $b(i, e[P(L-1, i)])$ (如图(2)示),有:
 $A(i) = \text{atan}(e[P(L-1, i-1)] - e[P(L-1, i)])$,
 $B(i) = \text{atan}(e[P(L-1, i)] - e[P(L-1, i+1)])$.
 定义: $C(i) = A(i) - B(i)$, 则 $C(i)$ 的大小反映了当分类数从 i 变到 $i+1$ 时,损失函数下降速度改变的大小,故定义 $C = \arg \max C(i) + 1$ 为所求的最佳分类数.

2.3 获得直方图阈值

将图像分为 C 类的阈值集由以下过程求得:

```

    令  $n = L - 1$ ;
    for  $i = C : -1 : 2$ 
         $T(i) = \text{code}(n, i); n = T(i) - 1$ ;
    end
    
```

则 $T(i)$ 即为所求.

2.4 图像二值分割

由于实际处理的红外图像,目标的辐射强度都明显高于背景,因而可以认为目标处于最高阈值划分段,令

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) \geq T(c) \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

则灰度值为1的点即为候选目标点.

3 实验处理说明

实验包含了点目标和斑点目标的情况.对点目标情况,实际采用 $D-4$ 小波对原图像进行4尺度分解;对斑点目标情况,实验采用 $D-1$ 小波对原图像进行6尺度分解.二值分割后,反复施以形态学开运算,直到图像不再变化,再执行一次形态学闭运算,以去除孤立点噪声及消除目标边沿的起伏.

4 实验结果及分析

采用本文方法对大量的红外弱小目标进行检测(包含点目标和斑点目标情况),与类别方差自动门限法进行对比,试验结果表明本文算法在目标精确定位方面具有优越性.

图3为点目标检测结果,目标为远距离天空背景下飞行的机动小目标,目标尺寸为 $20 \sim 30$ 像素.第一排左为原图像及根据检测结果计算得到的目标质心所圈定的目标区域,中间为原图像的灰度直方图,右为类别方差自动门限法分割的结果,阈值 $T = 194$;第二排左为原图像预处理结果,中间为对应的直方图,右为采用本文Fisher算法对预处理图像进行分割的结果,所获最佳分类数为4,阈值 $T = 26$.实验对比表明,由于目标像素在整个图像中所占比例甚小,传统直接的二值分割无法将目标从背景中分离出来,而本文所提算法却能将目标从复杂的背景中精确地提取出来.

图4为斑点目标检测结果,目标为远距离海空背景下的飞行器.与图3一样,第一排左为原图像及根据检测结果计算得到的目标质心所圈定的目标区

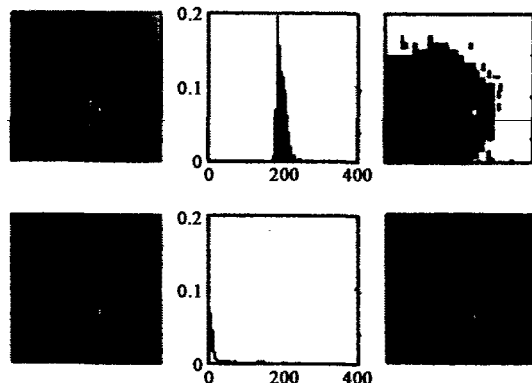


图3 点目标检测结果
Fig.3 Results of detection on dot object

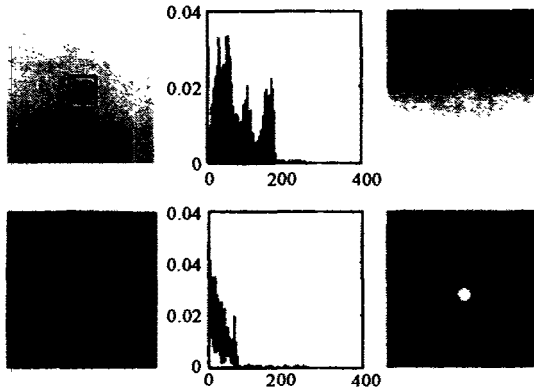


图4 斑点目标检测结果

Fig. 4 Results of detection on spot object

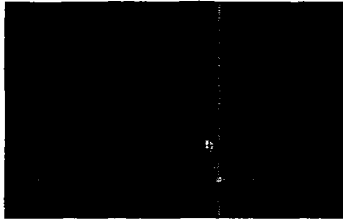


图5 目标运动轨迹估计

Fig. 5 Target's moving trace estimation

域,中间为原图像的灰度直方图,右为类别方差自动门限法分割的结果,阈值 $T = 75$;第二排左为原图像预处理结果,中间为对应的直方图,右为采用本文 Fisher 算法对预处理图像进行分割的结果,所获最佳分类数为 4,阈值 $T = 67$. 实验结果同样表明了所提算法的优越性.

图 5 为相邻帧差分运算的结果,从这里可以估计目标的运动态势,以便后续的跟踪处理.

5 结束语

目标检测技术虽然多种多样,但其技术的关键始终是针对目标的精确检测及定位.在该领域内,小波的多尺度分析特性、Fisher 算法灵活性和适应宽度,确有其独特的优势.随着小波方法在更广阔的领域的应用开发,其潜在的巨大应用价值必定会引起更多应用者的青睐.

REFERENCES

- [1] ZHANG Yong. Research on the application of wavelet transformation to infrared image terminal guidance. *J. Technology of Strategic Missile* (张勇. 小波变换在红外成像末制导中应用研究. *战术导弹技术*), 2001, 5: 50—53
- [2] LI Guo-Kuan, PENG Jia-Xiong, LI Hong. Small target detection based on multi-wavelet transform. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.* (李国宽, 彭嘉雄, 李红. 基于向量小波变换的小目标检测方法. *华中理工大学学报*), 2000, 28(1): 73—75
- [3] Strehl A, Aggarwal J K. Detecting moving objects in airborne forward looking infrared sequences. In: *Proceedings of the 99th IEEE Workshop on Computer Vision Beyond the Visible Spectrum: Methods and Applications*, (CVBVS'99), Colorado, USA, 1999: 3—12
- [4] QIN Qian-Qing, YANG Zong-Kai. *Practical wavelet analysis. Xi'an: Xi'an Electronic Technology University Press* (秦前清, 杨宗凯. *实用小波分析*. 西安: 西安电子科技大学出版社), 1994
- [5] WEI Bo, ZHANG Qi-Heng, LI Zai-Ming. Extracting weak target from the ocean scenes. *J. Infrared Millim. Waves* (魏波, 张启衡, 李在铭. 海面场景中弱小目标的提取. *红外与毫米波学报*), 2001, 19(5): 351—354
- [6] ZHU Hong, ZHAO Yi-Gong. Detection of weak and small moving infrared targets by adaptive prediction of background. *J. Infrared Millim. Waves* (朱红, 赵亦工. 基于背景自适应预测的红外弱小运动目标检测. *红外与毫米波学报*), 1999, 18(4): 306—310
- [7] ZHANG Yao-Ting, FANG Kai-Tai. *An Introduction to Multivariate Statistical Analysis*. Beijing: Science Press (张尧庭, 方开泰. *多元统计分析引论*. 北京: 科学出版社), 1997: 444—457